



Revisión del estado de arte en captación y aprovechamiento de aguas lluvias en zonas urbanas y aeropuertos

Review of the status of art collection and utilization of rain water in urban and airports

Adolfo León Agatón¹, Juan Carlos Córdoba Ruiz², Uriel Fernando Carreño Sayago³

Fecha de recepción: 05 de junio de 2015

Fecha de aceptación: 10 de septiembre de 2016

Cómo citar: León A., A.; Córdoba R., J.C. y Carreño S., U.F. (2016). Revisión del estado de arte en captación y aprovechamiento de aguas lluvias en zonas urbanas y aeropuertos. *Revista Tecnura*, 20(50), 141-153. doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a10

RESUMEN

Contexto: El agua es actualmente considerada como el recurso natural más crítico del planeta. Numerosos estudios realizados a nivel mundial demuestran que los sistemas de recolección de aguas lluvias han sido necesarias para para suplir diferentes necesidades básicas, uno de los pasos más importantes en la planificación de un sistema de recolección de aguas pluviales es la utilización de un método para determinar la capacidad óptima de tanques de recolección y almacenamiento

Método: En este trabajo se presenta diferentes conceptos de autores de artículos a nivel mundial que hacen referencia al aprovechamiento de agua lluvia, a su captación y aprovechamiento evitando que se desperdicie este recurso y que llegue a los alcantarillados y al arrasar con las basuras que encuentra lo que sucede es que contaminan y tapan estos doctos provocando inundaciones.

Resultados: La investigación han demostrado que los sistemas de captación de agua de lluvia promueven

el ahorro de agua en diversos ámbitos como por ejemplo en estadios, universidades escuelas, aeropuertos y zonas residenciales.

Conclusiones: se determina que el agua lluvia no se ha tenidos en cuenta como factor de ahorro, ni aprovechamiento de este recurso con respecto a un impacto ambiental. En cuanto al concepto de captación y aprovechamiento del agua lluvia se tiene en cuenta como todo tipo de esfuerzo técnico, simple o complejo, surgido de la iniciativa de algunas personas para almacenarla y ser aprovechada posteriormente para uso de los agricultores, descargas de inodoros, orinales y riego de jardines, lavado de pisos, entre otras. Si se profundiza en un estudio de costo beneficio para recolectarla y aprovecharla para ser remplazada por el agua potable, mostraría muy buenos resultados

Palabras clave: aguas lluvias, aprovechamiento de aguas lluvias, captación de aguas lluvias, sistemas de recolección.

1 Ingeniero Industrial, magíster en Ingeniería Industrial. Docente Fundación Universitaria Los Libertadores. Bogotá, Colombia. Contacto: aleona@libertadores.edu.co

2 Ingeniero industrial, candidato a magíster en Administración de Organizaciones. Docente Fundación Universitaria Los Libertadores. Bogotá, Colombia. Contacto: jccordobar@libertadores.edu.co

3 Ingeniero de Producción Biotecnológico, magíster en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Fundación Universitaria Los Libertadores. Bogotá, Colombia. Contacto: ucarrenos@libertadores.edu.co

Abstract

Context: Water is currently considered the most critical natural resource on the planet. Numerous worldwide studies have shown that rainwater harvesting systems have been needed to meet different basic needs. One of the most important steps in planning a rainwater harvesting system is to use a method to determine The optimal capacity of collection and storage tanks

Method: In this paper we present different concepts of authors of articles at a global level that refer to the use of rainwater, its capture and use avoiding that this resource is wasted and that it reaches the sewers and raking with the garbage found What happens is that they contaminate and cover these teachers causing flooding.

Results: Research has shown that rainwater harvesting systems promote water saving in a variety of

settings, such as stadiums, universities, schools, airports and residential areas.

Conclusions: it is determined that rainwater has not been taken into account as a saving factor, nor the use of this resource with respect to an environmental impact. As for the concept of catchment and use of rainwater, it is taken into account as any kind of technical effort, simple or complex, arising from the initiative of some people to store it and be used later for farmers, toilet flushing, urinals and irrigation of gardens, washing of floors, among other. If you go into a cost benefit study to collect it and take advantage of it to be replaced by drinking water, it would show very good results

Keywords: Rainwater, rainwater harvesting, rainwater harvesting, harvesting systems.

INTRODUCCIÓN

El agua es actualmente considerada como el recurso natural más crítico del planeta (Naciones Unidas, 2006). Numerosos estudios realizados en el mundo demuestran que los sistemas de recolección de aguas lluvias han sido importantes para suplir diferentes necesidades básicas, como: Australia (Marks et al, 2006; Tam et al., 2010), China (Gong, 2002; Yuan et al., 2003), Grecia (Sazakli et al, 2007), India (Goel y Kumar, 2005; Pandey et al., 2006), Indonesia (Song et al., 2009), Irán (Fooladman et al., 2004), Irlanda (Li et al., 2010), Jordania (Abdulla et al., 2009), Namibia (Sturm et al., s.f.), Singapur (Appan, 1999), Sudáfrica (Kahinda et al., s.f.), España (Domenech et al., 2011), Suecia (Villarreal y Dixon, 2005), Reino Unido (Fewkes, 1999), EE. UU. (Jones et al., 2010), Taiwán (Chiu et al., 2009) y Zambia (Handia et al., 2003). Uno de los pasos más importantes en la planificación de un sistema de recolección de aguas pluviales es la utilización de un método para determinar la capacidad óptima de tanques de recolección y almacenamiento. No deben ser demasiado grandes

(debido a los altos costos de construcción y mantenimiento), ni muy pequeños (ya que no se cumplen las exigencias de aguas lluvias). Esta capacidad se puede elegir con posterioridad a un análisis económico para diferentes escenarios (Chiu et al., 2009) o de los ahorros potenciales de agua potable para diferentes tamaños de depósito (Guisi et al., 2009).

Hoy se tiene el aprovechamiento del agua lluvia como fuente potencial de agua en las ciudades (Hatt y Fletcher, 2006); en países en vías de desarrollo, sobre todo, el aprovechamiento de aguas lluvias se ha convertido, en los últimos años, en una alternativa interesante, debido, principalmente, al bajo costo.

EXPERIENCIAS SOBRE APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS EN EL MUNDO**Europa**

Zhe et al. (2010) se enfocaron en el tratamiento de aguas residuales y de aguas lluvias, en el país de Irlanda, ciudad de Dublín; donde se buscó la

aplicación de estas estrategias por el agotamiento de fuentes hídricas con el paso de los años y el aumento excesivo de habitantes. Según el estudio, la demanda de agua se ha duplicado a nivel mundial cada 21 años, y lo más importante que revela este artículo es que el agua para las necesidades básicas, como beber y cocinar, es mínima; solo el 6 % del agua suministrada es destinada a estas necesidades. El porcentaje restante es usado en lo que los autores denominan "aumento del nivel de vida", es decir, higiene personal: en una casa típica el mayor volumen de agua es utilizada en aseo, ducha, inodoros, lavadoras y lavado de vajillas, este volumen es mucho mayor al requerido para beber y cocinar.

En Alemania, en el conjunto residencial Daimler Chrysler Potsdamer Platz, en Berlín, conformado por 19 edificios, se utilizan 32.000 m² de área de recolección de aguas lluvia en techos y una capacidad de almacenamiento de 3.500 m³ para descarga, riego, y alimentar un estanque artificial. El proyecto Belss-Luedecke-Strasse Building State se diseñó con un área de 7.000 m² de áreas de cubiertas para la recolección del agua y con otro sistema en los escurrimientos de las calles, los espacios de parqueaderos y las vías peatonales del conjunto que aportan otros 4.200 m² de área disponible. Se almacena el agua en una cisterna 160 m³ y después de un tratamiento de varios pasos, se utiliza para descargas y riegos (Ballén *et al.*, 2006).

En España el estudio desarrollado para evaluar la viabilidad económica y ambiental de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en las ciudades españolas, su construcción e implementación, y el uso de las aguas asociadas ofrecen una alternativa en el suministro doméstico de agua. Se desarrolló un modelo predictivo para estimar la viabilidad financiera y medioambiental del uso de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias para los tipos de vivienda en que estos pueden ser construidos, en las diferentes áreas urbanas. Los más viables, desde el punto de vista financiero, no son necesariamente los mejores en términos de posibles impactos ambientales, principalmente

por el alto porcentaje del efecto de la infraestructura sobre el impacto total, lo que requiere tener muy buenas estimaciones de la fase de utilización de los componentes más viables dentro de un sistema, que depende fundamentalmente de la cantidad de agua de lluvia que puede ser efectivamente aprovechada (Morales *et al.*, 2012).

África

En África la situación de abastecimiento de agua potable es crítica, debido a la escasez de fuentes apropiadas en términos de calidad y seguridad, falta de recursos económicos, tecnología inapropiada y altos niveles de pobreza. Por estos factores, el aprovechamiento de agua lluvia se ha constituido en una alternativa en países como Botswana, Togo, Malí, Malawi, Namibia, Zimbabue, entre otros. Se han adelantado proyectos en regiones donde hay muy baja precipitación y el nivel de agua superficial es muy pobre. En general en el continente el desarrollo de sistemas de aprovechamiento no ha tenido el desarrollo esperado, debido a las bajas precipitaciones, al reducido número y tamaño de las cubiertas de techos, al alto costo comparado contra los ingresos nacionales y a la escasez de elementos bases como arena y cemento (Ballén *et al.*, 2006). El continente sirve de ejemplo en cuanto al desarrollo de prácticas convencionales de aprovechamiento de carácter informal que se desarrollan con costos reducidos, eficiencias muy bajas y baja calidad de agua resultante, cuyo financiamiento proviene en su mayoría de agencias internacionales promotoras o subsidiarias, y que son adoptadas por familias de clase media utilizando tecnologías de bajo costo así como materiales disponibles en la zona y que solamente pueden suplir un porcentaje de la demandad total.

En la zona urbana de Zambia, por ser un país ubicado en el centro del continente africano, tan solo el 43 % de la población urbana tiene acceso a este recurso, a esto también se suma que es un país con un alto índice de condiciones de pobreza, lo cual dificulta aún más el acceso a este recurso. El

agua de lluvia que cae sobre el territorio se desperdicia y la potable es escasa, por lo tanto, se plantea la recolección de aguas pluviales, para dicho fin, se vinculan a los habitantes de la ciudad de Lusaka en un proyecto mediante el cual se pueda recolectar el agua que cae durante las tormentas, para darle un uso doméstico e, incluso, consumirla. Se realiza un plan piloto en escuelas de regiones alejadas donde el agua que cae sobre los techos es recibida en un canal, el cual dirige el líquido hacia unos recipientes plásticos de 210 litros (recipientes reutilizados que en alguna ocasión contenían aceite), en estos se almacena el agua para su posterior consumo, por parte de maestros y estudiantes. Este proyecto no fue de fácil aceptación por la comunidad de Zambia, dado que las aguas pluviales, más que representar un beneficio, implicaban una molestia, pues según ellos, solo generaban inundaciones en el terreno. La gobernación se dio a la tarea de realizar estudios de suelos e ingeniería de acueductos, para que la recolección de aguas pluviales se convirtiera en un hecho y no quedara solo en proyectos de escuela. Ya se habían aplicado estrategias como capacitar a la mujeres de la región para utilizar bombas de mano y elaborar de pozos subterráneos no muy hondos, de donde se podían abastecer; pero esto no era suficiente y se hizo necesario crear otra alternativa ante la gran demanda derivada de la llegada de más personas procedentes de zonas rurales a la capital (Handia y Madalitso, 2003).

Asia

Según Chiu, Liaw y Chen (2005), se entiende por *captación y aprovechamiento del agua de lluvia* todo tipo de esfuerzo técnico, simple o complejo, surgido de la iniciativa de los agricultores o desarrollo científicamente, para aumentar la cantidad de agua de lluvia que se almacena en el suelo o en estructuras construidas, para utilizarlas posteriormente, bajo condiciones de déficit de lluvias. El proyecto Siglo 121, en China, mediante un campo de recolección de agua y dos de almacenamiento

que abastecen un terreno de cultivo que beneficia a 1,2 millones personas y 1,18 millones de cabezas de ganado en la meseta de Loess de Geansu, muestra cómo es posible aprovechar este recurso.

En Singapur, el 86 % de los edificios de apartamentos cuentan con techos especialmente diseñados para la captación de aguas lluvias que son almacenadas en cisternas separadas. Por su parte, en Tokio en la zona de Ronjinson sobre la vía pública se tiene instalada una estructura que recolecta agua, la transporta a un pozo subterráneo y por medio de una bomba manual es utilizada para riego de jardines, aseo de fachadas y pisos, para combatir eventuales incendios y en situaciones de emergencia (Ballén *et al.*, 2006).

Oceanía

En Sídney se analizó el potencial de ahorro de agua potable por la instalación de tanques de recolección en diez viviendas unifamiliares, por eso se desarrolló un modelo de simulación con escala de tiempo, mediante el cual se estudiaron aspectos como confiabilidad de suministro, rendimientos financieros y ahorro de agua de cada familia usando tanques de 2 kl, 3 kl y 5 kl. Se concluyó que el ahorro de agua está relacionado directamente con el nivel de precipitación del lugar, la relación costo/beneficio para los tanques es menor a 1 y es necesario tener en cuenta las zonas de mayor consumo, como: aseo, lavado y riegos exteriores. El promedio de ahorro anual del agua está directamente relacionado con la precipitación anual del área en estudio, y una relación costo/beneficio mayor que uno (1) se podría alcanzarse con la implementación de los tanques de uso combinado (Ataur y Keanea, 2011).

En el campus de la Universidad Swinburne de Tecnología, en Melbourne, se desarrolló un modelo de balance hídrico con el cual se pretende optimizar el tamaño de los tanques para recolección de aguas lluvias; para el caso se tomaron como ejemplo dos tanques de 185 m³ y 110 m³ usados en la recolección de aguas pluviales subterráneas,

con el objeto de reducir su tamaño basados en sus rendimientos y diseño. Se tuvieron en cuenta aspectos como: variación tiempos y precipitación (húmedo, medio y seco), capacidad de almacenamiento, desbordamiento, dando como resultado que su mayor función se concentra durante el tiempo húmedo, mientras que en tiempo seco su utilidad se reduce en gran medida. Por otra parte, la vigencia para la recuperación de la inversión es muy amplia, lo que traería desventajas para el proyecto. Se desarrolló de modelo teniendo en cuenta un sistema de entradas y salidas, el cual depende de las precipitaciones (captación de agua), consumo, desperdicios y volumen de almacenamiento. Se obtuvo información de niveles de precipitación a través de datos estadísticos consultados durante los tres años anteriores (Monzur *et al.*, 2011).

América

En Norteamérica medio millón de personas utilizan sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias para uso doméstico, propósitos agrícolas comerciales e industriales. Actualmente existen 50 empresas establecidas especializadas en diseño de sistemas de aprovechamiento y su instalación. El Healthy House, una estructura de 158 m² ubicada en Toronto (Canadá), es autosuficiente en su abastecimiento de agua potable utilizando agua lluvia. Con una estructura de techos de recolección, canales y tanque de almacenamiento y tratando el agua con cal para reducir la acidez y suministrarle un sabor fresco, un sistema de filtro de arena fina y carbón activado para remover las impurezas y un sistema de desinfección mediante radiación ultravioleta, es un estructura autosuficiente (Ballén *et al.*, 2006).

La Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá, evaluó la viabilidad técnica y económica de utilizar el agua lluvia como alternativa para el riego y el lavado de zonas duras de su propio campus universitario (Lara *et al.*, 2007). En el Instituto María Auxiliadora de Caldas se desarrolló un proyecto tendiente a utilizar el agua lluvia como ahorro

de agua potable (Castañeda, 2010); el área total y el área de captación de aguas lluvia fueron calculados por un sistema de posicionamiento global (Londoño Silva, 2006).

MODELOS COSTO/BENEFICIO

Un estudio de viabilidad económica en España realizado por Morales *et al.* (2012), muestra que es posible modelar tanto los indicadores financieros convencionales como los indicadores de impacto, el uso de sistemas lineales y una escala de tamaño apropiado para la mayoría de los sistemas de captación de aguas pluviales. En conclusión, la demanda de agua doméstica para lavadoras tiene un menor impacto que el uso de agua del grifo. El factor determinante en el diseño de los sistemas de captación de aguas pluviales es la escala del sistema, donde la escala de barrio es la mejor alternativa. El material utilizado para el almacenamiento tanques no es un factor destacado. Sin embargo, definimos el almacenamiento del tanque con la ecuación (1).

$$NPV = \frac{SWt * WPt - Lt - MCt}{(1 + r)^t} \quad (1)$$

Donde:

SWt: ahorro de agua en el período t (m³).

WPt: precio del agua en t periodo (D / m³).

Lt: inversión necesaria en el periodo t (D).

MCt: mantenimiento y los costos de operación en el periodo t (D) (que también incluye la energía uso, detergente y agua).

n: tiempo de vida del sistema.

t: año del funcionamiento del sistema.

r: tasa de descuento.

El potencial de captación de aguas pluviales (en L / año) realizado por Farrenya *et al.* (2011), en techos se puede estimar basado en la precipitación local, el potencial de captación lo define la ecuación (2).

$$RWH = P * A * R \quad (2)$$

Dónde: (P, en mm / año), la cuenca zona (A, en m²) y el coeficiente de escorrentía (RC, adimensional).

Hyoungjun *et al.* (2012) desarrollaron un modelo probabilístico en donde se involucraban las diferentes variables en la captación de las aguas lluvias. Este modelo calcula la cantidad agua lluvia, la zona de captación, tanque de almacenamiento, contando con un sistema de recolección de agua. Este cálculo se basa en la ecuación de balance de agua.

La generación de modelos implica el desarrollo de ecuaciones de balance de masa para cada componente en la recolección de aguas pluviales (es decir, captación, tanque de almacenamiento y las instalaciones de infiltración). Se combinaron las ecuaciones de balance de masa y la densidad de probabilidad para la caracterización de la escorrentía aguas pluviales.

Cuando las precipitaciones superan la suma de la evaporación y el almacenamiento de retención, el escurrimiento suele referirse al volumen de las precipitaciones que cae sobre una superficie. Este se mide mediante la ecuación (3).

$$1 - \exp\left(-\alpha \frac{Q_{out} + Vt + Sc}{A}\right) \quad (3)$$

Donde:

Q_{out}, t salida del tanque(L3).

Vt volumen del depósito (L3).

Q_{in}, t flujo de entrada al depósito (L3).

Stb: almacena el agua de lluvia en el tanque antes de evento de lluvia (L3).

Q: necesaria cantidad de agua de lluvia para la demanda (L3).

Por tanto, la cantidad de escurrimiento de acuerdo con el rango de la precipitación en la zona de captación puede ser expresado por la ecuación (4).

$$\frac{\alpha}{A} \exp\left(-\alpha \frac{Q_{out} + Vt + Sc}{A}\right) \quad (4)$$

Monzur, Adballah, Aatur y Amimul (2011) presentan un estudio de caso de la evaluación del

depósito de agua de lluvia y el diseño de grandes áreas del techo, en Melbourne (Australia), basado en datos de precipitación diaria observados, con el propósito de desarrollar una herramienta de apoyo a las decisiones para el análisis de rendimiento y diseño de los tanques de agua de lluvia. En este estudio, se consideran dos tanques de almacenamiento de 185 m³ y 110 m³ subterráneos. El estudio establece la necesidad de optimización detallada y análisis financiero más exhaustivo.

Desarrollaron una ecuación para calcular el ahorro producido con la utilización del aprovechamiento de las aguas lluvias:

$$PV = \frac{St}{(1+i)^t} \quad (5)$$

Donde:

St: es el ahorro en un año 't', 'i' es la tasa de descuento o devolución.

Eroksuz y Aatur (2010) desarrollaron una ecuación que permite predecir cuál debe ser el ahorro, dependiendo de la demanda (ecuación (6)).

$$\log(W) = -6.309 + 0.779 \log(A) + 0.318 \log(T) + 2.078(R) \quad (6)$$

Donde:

W es un ahorro medio anual de agua en m³.

A es el área del techo en m².

T es el tamaño del tanque de agua de lluvia en m³.

R es la precipitación media anual en mm.

La ecuación tiene un coeficiente de determinación (R²) = 96 %, con error estándar de estimación del 2 % de ahorro medio anual de agua. La ecuación es válida para Sídney, Newcastle y Wollongong, ciudades de Nueva Gales del Sur.

Kang y Hyun (2004) desarrollaron una metodología para el establecimiento de las relaciones probabilísticas entre la capacidad de almacenamiento y la velocidad de déficit de un sistema de aguas lluvias a la hora de considerar el cambio climático. Un edificio de cuatro pisos en una universidad fue seleccionado como caso de estudio. El escenario fue reducido a la zona de estudio con el SDSM (modelo de regionalización estadística)

y las distribuciones probabilísticas fueron seleccionados y modelada según los resultados de las pruebas de bondad de ajuste. Como resultado, se deriva un conjunto de curvas que describen las relaciones entre la capacidad de almacenamiento y la tasa de déficit. A partir de estas curvas, se determinó que la capacidad de almacenamiento de los RWHS estudiados podría reducirse debido al aumento de la precipitación media anual cuando se considera el impacto del cambio climático. Sin embargo, la consideración del cambio climático no puede ser importante para determinar la capacidad de almacenamiento de RWHS cuando se planifican los lugares que muestran suficientes precipitaciones durante todo el año. Este resultado puede ser útil para los ingenieros RWHS y tomadores de decisiones.

RECOLECCIÓN Y ALMACENAMIENTO, TANQUES, BOMBEO Y GRAVEDAD

De acuerdo con el tipo de recolección de aguas lluvias se necesitará de la calidad de techos y de recipientes para almacenarla. Farreny *et al.* (2011) establecieron la calidad de los techos a la hora de recolectar aguas lluvias, integrando datos cuantitativos y cualitativos de las azoteas en una zona urbana. Cuatro tipos de techo se seleccionaron y muestrearon durante un periodo de dos años; tres tipos de techo inclinado: techos de tejas de barro; láminas de metal, policarbonato y plástico, y una azotea plana de grava. Se estableció un modelo para la estimación del volumen de escorrentía y la captación inicial de cada techo para evaluar la contaminación fisicoquímica de la escorrentía del techo. Los parámetros de calidad muestreados indicaron que el agua no se contaminaba con ningún techo en específico.

En cuanto a modelación probabilística de agua lluvia, Hyoungjun *et al.* (2012) desarrollaron un modelo probabilístico en donde se involucraban las diferentes variables en la captación de las aguas lluvias. Este modelo calcula la cantidad de agua lluvia, la zona de captación, tanque de

almacenamiento, mediante un sistema de recolección de agua, este cálculo se basa en la ecuación de balance de agua. La generación de modelos implica el desarrollo de ecuaciones de balance de masa para cada componente en la recolección de aguas pluviales (es decir, captación, tanque de almacenamiento y las instalaciones de infiltración). Se combinaron las ecuaciones de balance de masa y la densidad de probabilidad para la caracterización de la escorrentía de aguas pluviales.

El trabajo de Monzur *et al.* (2011) muestra un estudio de caso de la evaluación del depósito de agua de lluvia y el diseño de grandes áreas del techo, que se encuentra en Melbourne, Australia, basado en datos de precipitación diaria observados. Con el objetivo de desarrollar una herramienta de apoyo a las decisiones para el análisis de rendimiento y diseño de los tanques de agua de lluvia. En este estudio, se consideraron dos tanques de almacenamiento de 185 m³ y 110 m³ subterráneos. Utilizando el modelo desarrollado, el estudio establece la necesidad de optimización detallada y análisis financiero más exhaustivo.

En cuanto al cálculo de las precipitaciones de los diferentes sectores, Muna y Han (2011) establecieron los principales parámetros de diseño en la captación de aguas pluviales; estos son: precipitaciones, área de influencia, eficacia de recolección, volumen del tanque y demanda de agua. El análisis de sensibilidad en la captación de aguas lluvias fue muy bien recibido en Seúl (Corea del Sur), ya que posibilita esta alternativa como una de las más factibles para superar el déficit de agua en épocas de sequía.

Uno de los análisis más utilizados es el aprovechamiento de aguas lluvias es el estudio de modelación matemática costo/beneficio. Farrenya *et al.* (2011), en España, analizaron la relación costo/eficacia de varios sistemas de recolección de aguas lluvias en entornos urbanos. La investigación se basa en un estudio de caso en un barrio de viviendas sociales (600 habitantes/ha) con edificios de varios pisos. El barrio se encuentra en Granollers, ciudad con un clima mediterráneo (precipitación

media de 650 mm/año). Cuatro estrategias se definieron para realizar el estudio: a) construcción/escala de barrio y adaptar la acción frente a la nueva construcción; b) escenarios de precios del agua (los precios actuales del agua y el futuro aumento de los precios del agua); c) la relación costo/eficacia de estas estrategias, los sistemas de transporte, almacenamiento y distribución de agua de lluvia necesarias, y d) los términos económicos a través del *valor actual neto* dentro de un enfoque *costeo del ciclo de vida*.

En lo relacionado con el aprovechamiento de aguas lluvias en hogares familiares, Rahmana *et al.* (2011) investigaron sobre el potencial de ahorro de agua de los tanques de agua de lluvia instalados en viviendas unifamiliares en 10 lugares diferentes en Greater Sydney (Australia). Desarrollaron una simulación de balance de agua donde observaron la confiabilidad de este sistema, examinando tres tipos de tanque. Se encontró que el promedio anual de ahorro de agua en los tanques está fuertemente relacionado con la precipitación promedio anual. Los resultados de este estudio sugieren que las autoridades gubernamentales en Sídney deben mantener o, posiblemente, incentivar a la población para la máxima construcción de estos sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias.

Aprovechando el agua lluvia, Ballén *et al.* (2006) determinaron la factibilidad de utilizar el agua lluvia como fuente de abastecimiento para el consumo humano, esto si se cuenta con un adecuado tratamiento que potabilice el recurso. Para nuestro caso es importante cómo se puede aprovechar el agua lluvia sin tener que tratarla con productos químicos como los utilizados para el consumo humano, sino como fuente para cubrir la demanda generada por los usos que no requieren agua potable para su desarrollo (riego de jardines y plantas, lavado de autos, descarga de inodoros, aseo de pisos y lavado de ropa).

En Colombia es necesario tecnificar la aplicación de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias, esto debido a que la mayoría de las aplicaciones realizadas son de tipo empírico sin un

diseño previo que corresponda a las características ambientales de la región y a las necesidades de los usuarios, ya que del adecuado diseño y mantenimiento del sistema depende la calidad y cantidad del agua suministrada.

En cuanto a la optimización de estructuras para el aprovechamiento de agua lluvia, López *et al.* (2009) presentaron una investigación sobre la arquitectura que debe tener un sistema para la recolección de aguas lluvias por medio de fachadas cerradas denominadas *culatas*, específicamente en el Valle de Aburrá (Colombia), para uso doméstico de no consumo, especialmente para la descarga de aparatos sanitarios. De esta manera se obtienen múltiples beneficios: a) ahorro de agua; b) ingresos por publicidad; c) regulación microclimática de la vivienda con la ayuda de los dispositivos que reflejan el sol y crean una cámara de aire entre el exterior y el interior, y d) recolección y uso de aguas lluvias. En la región de Santander (Colombia), Barragán y González (2012) plantearon el uso de aguas lluvias como alternativa a la situación de escasez y así aumentar la oferta de agua potable en el municipio de Barichara, teniendo en cuenta que la captación de agua pluvial constituye una opción viable, ecológica y económica para enfrentar, a corto plazo, el problema por su fácil implementación. Se dimensionaron tanques de almacenamiento óptimos partiendo de los análisis de superficies de captación y de estudios realizados a partir de la serie de precipitaciones diarias de veinte años, tomadas de la estación pluviométrica Santa Isabel (Ideam) ubicada en el municipio.

Los materiales de cubiertas son importantes en el diseño de una cuenca de captación. Mendez *et al.* (2011) examinaron el efecto de estos para techos convencionales sobre la calidad del agua de lluvia recolectada. Los resultados de escala piloto y los techos a gran escala demostraron que el agua de lluvia recolectada de cualquiera de estos materiales para techos requeriría tratamiento, si fuera para consumo humano, de filtración y desinfección. Los techos de metal se recomiendan comúnmente para aplicaciones de agua de lluvia y

este estudio mostró que los sistemas con techos de metal tienden a tener concentraciones más bajas de bacterias indicadoras de las heces, en comparación con otros materiales para techos. Sin embargo, baldosas de hormigón y techos frescos poseen una situación similar a la de los techos de metal, lo que indica que estos materiales son también adecuados para aplicaciones de agua de lluvia. Las concentraciones de algunos metales (por ejemplo, el arsénico) en el agua de lluvia del techo verde indican que la calidad de los sustratos comerciales debe examinarse cuidadosamente si el agua de lluvia recolectada está siendo considerada para el uso doméstico.

La calidad del agua es de vital importancia. Mendez *et al.* (2011) hicieron un estudio sobre diferentes techos en la captación de aguas lluvias y detallaron la calidad del agua en cada uno de estos. Integraron datos cuantitativos y cualitativos de la azotea sobre esorrentía de aguas pluviales en un ambiente mediterráneo de clima urbano, con el objetivo de proporcionar criterios para la selección del techo y así maximizar la disponibilidad y calidad del agua de lluvia. Se seleccionaron y monitorearon cuatro techos durante un periodo de dos años (2008-2010); tres techos inclinados elaborados con tejas de barro, hoja de metal y plástico de policarbonato, y otro de grava plana. Se observaron grandes diferencias en el coeficiente de escurrimiento (RC), dependiendo sobre todo de la pendiente y la rugosidad de la cubierta. Los techos inclinados lisos ($RC > 0,90$) captaron aproximadamente el 50 % más de agua de lluvia que los techos en bruto planas ($RC = 0,62$). La inclusión de criterios relacionados con la pendiente y la rugosidad en la planificación de la ciudad del techo puede ser útil para promover el agua de lluvia como un suministro de agua alternativo, para la prevención de inundaciones y la escasez de agua.

En una institución educativa del municipio de Caldas (Antioquia), se propuso un diseño de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia como alternativa para el ahorro de agua potable en sanitarios y lavado de aguas comunes (Palacios, 2010).

La Universidad Industrial de Santander diseñó un sistema de mejora al aprovechamiento del agua lluvia, para utilizarlo en un sistema de riego por aspersión (Pérez y Sanabria, 2012).

Se necesitan herramientas para la optimización del diseño de los tanques de agua de lluvia. Para esto, Monzur *et al.* (2011) desarrollaron, a través de datos, la confiabilidad de cada sistema de captación de aguas lluvias para la toma de decisiones relevantes a la hora de implementar los tamaños de los tanques. Los máximos alcanzables para los diferentes programas de acción regionales razonables en diferentes condiciones climáticas se presentan para todos los lugares seleccionados en este estudio. Un modelo de balance hídrico diario se utilizó para el análisis de rendimiento y optimización del diseño de los tanques de agua de lluvia en cuatro regiones diferentes de Melbourne, norte, centro, sureste y suroeste.

CALIDAD DEL AGUA RECOLECTADA, PARTÍCULAS Y MICROORGANISMOS

Se ha encontrado que la concentración de contaminantes presentes en las aguas de esorrentía urbana depende también de depósitos atmosféricos en tiempo seco y en tiempos de lluvia (Gromaire *et al.*, 1999; Schueler y Holland, 2000; Gobel, Dierkes y Coldewey, 2007). Adicionalmente, Rodríguez, García y Pardo (2015) muestran cómo la composición típica de agua residual necesita de un grado alto de tratamiento para cumplir con las normatividades, basados en atributos de las cualidades y propiedades del agua y teniendo en cuenta el impacto del entorno en el medio ambiente, como olores e impactos estéticos. Esto le brinda mayor importancia al aprovechamiento de agua lluvia para que no llegue a mezclarse con las aguas contaminadas y así incrementar su volumen.

Georgios *et al.* (2012) investigaron sobre la calidad del agua con seis casos de estudio a escala piloto de recolección de agua de lluvia, donde se instalaron en cinco casas urbanas, suburbanas y rurales, y en un campus universitario. Los sistemas

consisten en canales horizontales para recoger las aguas lluvias y tanques de almacenamiento de plástico. También se proporcionaron dispositivos para eliminar el agua del primer lavado. En el agua de lluvia recolectada la calidad se encontró satisfactoria sobre sus parámetros fisicoquímicos, pero no en cuanto a su calidad sanitaria. Por consiguiente, los sistemas de recolección de agua de lluvia en esta zona solo podían abastecer de agua apropiado para utilizar como aguas grises.

Los parámetros para medir la calidad de aguas lluvias en las áreas urbanas son: turbiedad, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno y metales pesados presentes en el agua. Estos últimos, presentes en las aguas lluvias de escorrentía, dependen de las partículas de polvo en la atmósfera provenientes de actividades industriales y semiindustriales de las zonas urbanas y de la corrosión que se dan en las superficies de tejados. Los parámetros varían de acuerdo a: cadmio (Cd), de 0,1 a 32 microgramos por litro; cobre (Cu), de 3 a 247 microgramos por litro; plomo (Pb), de 16 a 276 microgramos por litro; zinc (Zn), de 802 a 3806 microgramos por litro (Gobel, Dierkes y Coldewey, 2007). Los sólidos suspendidos totales (SST) varían entre 3 y 304 mg⁻¹. Los valores bajos de pH varían entre 4,7 y 6,8 (Gobel, Dierkes y Coldewey, 2007). La demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días (DBO5) se encuentra entre 1 mg⁻¹ y 27 mg⁻¹ (Gromaire- Mertz Gromaire, 2007).

En un muestreo realizado en el barrio Kennedy de Bogotá y el municipio de Soacha, en donde varias comunidades que habitan en sectores periféricos sufren de condiciones precarias y limitadas de abastecimiento, que recolectan y utilizan aguas lluvias para diferentes usos domésticos, se encontró que el agua estudiada no es apta para ninguno de los usos que se les están dando actualmente, debido a los altos valores de turbiedad y altas concentraciones en metales pesados (Torres *et al.*, 2011). En un muestreo realizado en Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, utilizando nueve puntos repartidos dentro del campus, denominados *puntos de muestreo*, se encontró que el

agua de escorrentía no era apta para ninguno de los usos inicialmente considerados, como lavado de fachadas y pisos, riego de jardines y vaciado de inodoros, debido a las altas concentraciones encontradas de metales pesados, sólidos suspendidos totales (SST) y su grado de contaminación (DBO%) además de la turbiedad presentada (Torres *et al.*, 2011). Otra experiencia de estudio realizada en un campo universitario es el de la Universidad Nacional, sede Bogotá, en el Edificio de Posgrados de Ciencias Humanas, donde mediante una cubierta de techo revestida con grava, almacenando en un tanque subterráneo y por medio de bombeo se utiliza para descarga de inodoros y alimentar las fuentes y los espejos de agua (Ballén *et al.*, 2006). También se ha determinado cómo el agua lluvia afecta los recursos hídricos cuando transportan elementos metálicos por las corrientes y los diferentes contaminantes del suelo, aumentando así la contaminación de elementos pesados en las fuentes hídricas en Bogotá (Zafra, Peña y Álvarez, 2013).

APROVECHAMIENTO DE AGUA DE LLUVIA EN AEROPUERTOS

Los aeropuertos consumen una gran cantidad de agua en el desarrollo de sus operaciones rutinarias y en el mantenimiento de sus infraestructuras. Estas disponen, en general, de una importante área de techos que son susceptibles de ser utilizadas para la recolección de agua lluvia y sistemas de reutilización. La eficiencia y posibilidad de estos sistemas han sido estudiadas por diversos autores. Domenech *et al.* (2011); Jones *et al.* (2010); Li *et al.* (2010); Méndez *et al.* (2011), han descrito que dicha posibilidad depende en gran medida de la calidad del agua recolectada, que a su vez depende de las condiciones atmosféricas de la región, la presencia o ausencia de árboles y aves, y las superficies en las cuales se recibe y recolecta. El agua lluvia está sujeta a contaminación ocasionada por microorganismos y sustancias químicas. Para ser aprovechada debe ser tratada con anterioridad. El

nivel y cobertura de tratamiento depende de la intensidad de uso, potable o no, y de las condiciones de las superficies de recolección (Helmreich y Horn, 2009).

Los 1318 aeropuertos estudiados en 157 países en el año 2010 contribuyeron como estructura a movilizar 5 billones de pasajeros, con un incremento del 6,6 % con respecto al año anterior. Estas infraestructuras demandan una gran cantidad de agua para sus operaciones rutinarias, que puede ser comparada con las de una ciudad de tamaño medio. El aeropuerto de Heathrow, en Londres, consume el agua equivalente a una ciudad de 34.000 habitantes. El aeropuerto de Atlanta, Hartsfield-Jackson, consume la misma cantidad de agua de una ciudad de 15.000 habitantes. El de Charles de Gaulle, en París, el de una ciudad de 31.000 habitantes. En Brasil, los 20 principales aeropuertos consumen el 90 % del agua potable de la oferta, 4,8 millones de metros cúbicos en el año 2010, en actividades como aire acondicionado, irrigación de pistas, lavado de áreas pavimentadas, control de incendios y sanitarios, actividades que no requieren de agua potable. Todas estas instalaciones cuentan con enormes áreas de techo susceptibles de ser utilizadas para la recolección de agua de lluvia y control de presencia de aves y administración de vegetación de altura, lo que minimiza los riesgos de contaminación microbiana del agua (Moreira *et al.*, 2012). Estudios de posibilidad y viabilidad han sido desarrollados en estos ambientes por autores como Eroksuz y Aatur (2010); Guisi *et al.* (2009); Jones *et al.* (2010); Li *et al.* (2010) y Aatur y Keane (2011). Domenech *et al.* (2011) establecen que la viabilidad de la utilización del agua lluvia en aeropuertos depende de los usos finales, generalmente para unos cuantos propósitos específicos. El objetivo de este estudio fue investigar el consumo de agua en un aeropuerto de tamaño medio en Brasil, para determinar la demanda de agua potable y evaluar el potencial ahorro de agua de tanques de agua de lluvia mediante el análisis de la simulación (balance de agua).

CONCLUSIONES

La investigación sobre el diseño y la implementación de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias es un campo que está cobrando relevancia e importancia, pasando de los sistemas artesanales locales como esfuerzos aislados a desarrollos tecnológicos económicamente viables y técnicamente eficientes, que se ajustan a las condiciones físicas del entorno, del ambiente, económicas de la población, entre otras. El desarrollo de la investigación surge de la necesidad de generar una cultura de manejo responsable del agua, como una parte de la problemática que involucra todos los aspectos del manejo del recurso. En este artículo se recopilan algunos de los estudios realizados con la óptica global para recalcar la necesidad mundial actual, siendo una actividad que puede ser realizada en múltiples ambientes y circunstancias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Appan, A. (1999). A dual-mode system for harnessing roofwater for non-potable uses. *Urban Water*, 1, 317-321.
- Aatur, R., Keane, J., & Monzur, A. I. (2012). Rainwater harvesting in Greater Sydney: Water savings, reliability and economic benefits. *Resources, Conservation and Recycling*, 61, 16-21.
- Ballén, J. A; Galarza, M. A., & Ortiz, R. O. (2006). Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia. Simposio llevado a cabo en el VI Seminário Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Água (SEREA), Joao Pessoa, Brasil.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2003). *Especificaciones técnicas captación de agua de lluvia para consumo humano*. Lima, Perú: Organización Panamericana de la Salud.
- Chiu, Y. R.; Liaw, C. H., & Cheng L. C.(2009). Optimizing rainwater harvesting systems as an innovative approach to saving energy in hilly communities. *Renewable Energy*, 34, 492-498.

- Domenech, L., & Saurí, D. (2011). A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the Metropolitan Area of Barcelona (Spain): social experience, drinking water savings and economic costs. *Journal of Cleaner Production*, 19, 598-608.
- Eroksuz, E., & Aatur, R. (2010). Rainwater tanks in multi-unit buildings: A case study for three Australian cities. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 1449-1452.
- Farreny, R., Morales-Pinzón, T., Guisasola, A., Taya, C., Rieradevall, J., & Gabarrell, X. (2011). Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain. *Water Research*, 45, 3245-3254.
- Farrenya, R., Gabarrell, X., & Rieradevall, J. (2011). Cost-efficiency of rainwater harvesting strategies in dense Mediterranean neighbourhoods. *Resources, Conservation, and Recycling*, 55, 689-694.
- Fewkes, A. (2000). Modelling the performance of rainwater collection systems: towards a generalized approach. *Urban Water*, 1, 323-333.
- Fewster, P. F. (2004). Advances in the structural characterisation of semiconductor crystals by X-ray scattering methods. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 48-49, 245-273.
- Gikas, G. D., & Tsihrintzis, V. A. (2012). Assessment of water quality of first-flush roof runoff and harvested rainwater. *Journal of Hydrology*, 466-467, 115-126.
- Göbel, P., Dierkes, C., & Coldewey, W. G. (2007). Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of Contaminant Hydrology*, 91, 26-42.
- Goel, A. K., & Kumar, R. (2005). Economic analysis of water harvesting in a mountainous watershed in India. *Agricultural Water Management*, 71, 257-266.
- Gromaire-Mertz, M. C., Garnaud, S., González, A., & Chebbo, G. (1999). Characterization of urban runoff pollution in Paris. *Water Science and Technology*, 39, 1-8.
- Handia, L., Tembo J. M., & Mwiindwa, C. (2003). Potential of Rainwater harvesting in urban Zambia. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, 893-896.
- Hatt, B. E., Deletic, A. & Fletcher, T. D. (2006). Integrated treatment and recycling of stormwater: a review of Australian practice. *Journal of Environmental Management*, 79, 102-113.
- Helmreich, B., & Horn, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, 248, 118-124.
- Hyoungjun K., Mooyoung H., & Ju Y. L. (2012). The application of an analytical probabilistic model for estimating the rainfall-runoff reductions achieved using a rainwater harvesting system. *Science of the Total Environment*, 424, 213-218.
- Jones, M. P., & Hunt, W. F. (2010). Performance of rainwater harvesting systems in the south eastern United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 623-629.
- Kahinda, J. M., Taigbenu, A. E., & Borot, R. J. (2007). Domestic Rainwater harvesting to improve water supply in rural South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 32, 1050-1057.
- Li, X. Y., & Gong, J. D. (2002). Compacted microcatchments with local earth materials for rainwater harvesting in the semiarid region of China. *Journal of Hydrology*, 257, 134-144.
- Li, Z., Boyle F., & Reynolds, A. (2010). Rainwater harvesting and greywater treatment systems for domestic application in Ireland. *Desalination*, 260, 1-8.
- Méndez, C. B., Klenzendorf, J. B., Afshar, B. R., Simmons, M. T., Barrett, M. E., Kinny, K. A., & Kirisits, M. J. (2011). The effect of roofing material on the quality of harvested Rainwater. *Water Research*, 45, 5, 2049-2059.
- Mitchell, V. G., McCarthy, D. T., Deletic, A., & Fletcher, T. D. (2008). Urban stormwater harvesting- sensitivity of a storage behaviour model. *Environmental Modelling & Software*, 23, 6, 782-793.
- Monzur, A. I., Abdallah, S., Aatur, R., & Amimul, A. (2011). Optimisation of rainwater tank design from large roofs: A case study in Melbourne, Australia. *Resources, Conservation and Recycling*, 55, 1022-1029.
- Morales-Pinzón, T., Lurueña, R., Rieradevall, J., Gasol, C. M., & Gabarrell, X. (2012). Financial feasibility and environmental analysis of potential rainwater

- harvesting systems: A case study in Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 130-140.
- Moreira, R. F., Carvalho, I. C., Calijuri, M. L., & Santiago, A. F. (2012) Rainwater treatment in airports using slow sand filtration followed by chlorination: Efficiency and costs. *Resources, Conservation and Recycling*, 65, 124-129.
- Moreira, R. F., Carvalho, I. C., Calijuri, M. L., & Santiago, A. F. (2012). Rainwater use in airports: A case study in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, 68, 36-43.
- Palacio-Castañeda, N. (2010). *Propuesta de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia, como alternativa para el ahorro de agua potable, en la institución María Auxiliadora de Caldas*. Trabajo de Monografía para optar al título de Especialista en Manejo y Gestión del Agua. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Pandey, P. K., Panda, S. N., & Panigrahi, B. (2006). Sizing on-farm reservoirs for crop-fish integration in rain-fed farming systems in Eastern India. *Biosystems Engineering*, 93, 475-489.
- Sazakli, E., Alexopoulos, A., Leotsinidis, M. (2007). Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece. *Water Research*, 41, 2039-2047.
- Schueler, T. y Holland, H. (2000). *Is Rooftop Runoff Really Clean? The Practice of Watershed Protection*. Ellicott City, MD (EE. UU.): Center for Watershed Protection.
- Song, J., Han, M., Kim, T., & Song, J. (2009). Rainwater harvesting as a sustainable water supply option in Banda Aceh. *Desalination*, 248, 233-240.
- Sturm, M., Zimmermann, M., Schütz, K., Urban, W., & Harfung, H. (2009). Rainwater harvesting as an alternative water resource in rural sites in central northern Namibia. *Physics and Chemistry of the Earth*, 34, 776-785.
- Villarreal, E. L., & Dixon, A. (2005). Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrköping, Sweden. *Building and Environment*, 40, 1174-1184.
- Tam, V. W. Y., Tam, L. & Zeng, S. X. (2010). Cost effectiveness and tradeoff on the use of rainwater tank: An empirical study in Australian residential decision-making. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 178-186.

